

論文 乾燥収縮が柱の曲げ性状に与える影響に関する解析的研究

劉 思芸*1・ケイ ショウコ*1・楊 子昂*1・渡部 嗣道*2

要旨：上下端を固定した柱に長期的な鉛直荷重が作用する場合としない場合において、乾燥収縮を生じさせた場合の外力条件を設定し、乾燥収縮による長期的性状変化がその後の短期的な曲げ性状に及ぼす影響を評価するために、非線形 FEM 解析を行った。乾燥収縮が作用する場合には、最大曲げモーメントに対しては大きな影響がないことが分かった。一方、剛性に対する影響については、乾燥収縮による影響は少なからずあり、短期的な曲げ剛性に関して構造的な低下をもたらす可能性があることが分かった。特に軸力が作用しないほうが大きな影響を受けた。

キーワード：クリープ、乾燥収縮、有限要素法、逐次積分法、柱

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物では、乾燥収縮やクリープが長期にわたり継続的に生じ、これらの長期性状がその後の構造性能に影響を及ぼす恐れがある。そこで、著者らは、長期的な構造性状の変化を評価できる 3 次元静的構造解析用 FEM ソフトウェア「Soft OCU」を開発し¹⁾、乾燥収縮やクリープを生じる部材がその後の構造性能に与える影響に関する解析的な研究を行っている²⁾。このソフトウェアは、コンクリートの乾燥収縮が生じる応力および変形を、逐次計算する Step by step 法を適用するもので、長期的な解析をするとともに、その後の Pushover などの静的耐震解析も可能としている。その中でも、著者らは、これまで、柱に長期間の軸力を持続させ、乾燥収縮やクリープなど長期的な変形を生じさせた後、短期的な性状として曲げ破壊の解析を行っている^{3), 4)}。これらの解析では、クリープの影響が非常に大きいとの結果が得られた。しかし、この場合の解析条件は限定的で、乾燥収縮の影響に関しては十分な検討が行われていない。

そこで、本研究では、乾燥収縮の大きさを変化させ、長期的な変形解析の後に曲げ破壊解析を行い、乾燥収縮が柱の曲げ性状に及ぼす影響を、クリープによる影響と比較しながら解析的に評価することとした。

2. 解析計画

(1) FEM 要素モデル

「Soft OCU」でのコンクリート要素は、8 節点 6 面体要素とし、ひび割れ解析には分散ひび割れモデルを用いている。鉄筋要素は bar 要素とし、離散鉄筋モデルとした。また、鉄筋とコンクリートとの節点間は剛結とした。

(2) 長期解析

乾燥収縮ひび割れやクリープひずみなどによって生じるひび割れや長期たわみなどの変形性状を解析するために、弾塑性解析を伴う逐次積分法 (Step by step 法) を

適用した。まず、乾燥収縮ひずみが作用した場合には、その時点での 3 次元応力場の弾性応力から主応力と等価一軸ひずみを求め、コンクリートの 1 軸応力ひずみ関係に応じた 3 次元弾塑性解析を行った。この場合は、瞬時 (短期) の破壊として取り扱っている。続いて、長期的な解析として、それから求められた弾性応力に対してクリープ係数を乗じてクリープひずみを求めた。

(3) 短期解析との連成解析

本解析については、既報²⁾と同様に、長期解析用と短期解析用 (静的非線形増分解析 (Pushover)) の 2 つの解析ツールを有するプログラムを連成して実施する。長期解析と短期解析との連成は、長期解析による変形や応力をそのまま残した状態で短期解析に移行する。解析プロセスを図-1 に示す。

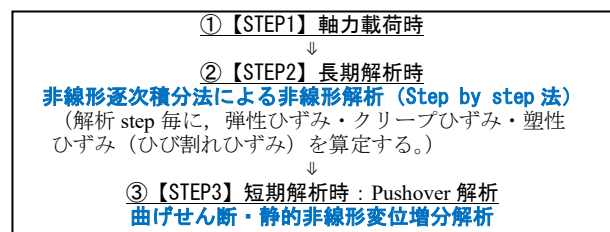


図-1 解析プロセス

(4) 材料構成則

材料構成則について、長期解析および短期解析とも同じとし、コンクリートの物性は長期的に変化しないものとする。コンクリートの応力ひずみ関係は、除荷も含めて既報^{3), 4)}と同じとし、乾燥収縮ひずみおよびクリープひずみの発生における応力ひずみ関係はこの履歴に準ずるとした。また、鉄筋は SD345 とし、離散鉄筋で、バイリニア型の完全弾塑性とした。

(5) 長期解析における設定条件

長期解析における設定条件を表-1 に示す。長期解析の期間を 50 年とし、乾燥収縮ひずみの最終値は、0~600

*1 大阪公立大学大学院 生活科学研究科居住環境学専攻 (学生会員)

*2 大阪公立大学大学院 生活科学研究科居住環境学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 阪神高速技術先進技術研究所 調査研究部 博士 (工学) (正会員)

$\times 10^{-6}$ とした。また、想定したコンクリートの圧縮強度は、 27N/mm^2 とした。軸力比（コンクリート強度による柱の圧縮耐力に対する軸力の比）は、0 あるいは 0.2 とした。コンクリートの調合条件は、単位水量の小さな高性能 AE 減水剤による実用的なコンクリートを適用し⁵⁾、その調合（標準調合表）を表-2 に示す。乾燥収縮および長期軸力の作用開始は、建築建物の工期を約 1 年と想定して材齢 1 年とした。乾燥収縮およびクリープによる長期解析は、この軸力作用と同時に開始した。乾燥収縮ひずみの履歴は、表-2 の調合条件で土木学会式⁶⁾で算定した値を実数倍して、50 年間で所定の値となるようにした。Step by step 法によるクリープ係数の履歴は、これも土木学会規準による値とした。

(6) 解析モデル

柱の寸法は、幅 $600 \times$ せい $600 \times$ 高さ 3000mm とし、その両端には十分な厚さと幅を持つスタブ (stub) が取り付けられ、ラーメン構造を想定した柱端部の主筋定着やコンクリートの破壊現象が実状に近いようにしている。主筋は D25 とし、各辺とも各 5 本・計 16 本設置した。せん断補強筋は D13 とし、せん断破壊しないようにした。また、コンクリートの力学的な性質について、柱については弾塑性体、スタブについては弾性体（初期ヤング係数は柱と同じ）とした。柱の解析断面を図-2 に示す。コンクリート表面と主筋中心との距離は柱幅の 0.1 倍した値とした。図-3 にモデルの寸法と解析モデルを示す。

(7) 長期解析および短期解析における加力概要

曲げ性能を評価する場合のモデルと加力概要を図-4 に示す。長期解析では柱のみのモデルに対して上下端からの長期軸力およびモデル自身での乾燥収縮ひずみを負荷した。長期解析が終了すると、直ちにスタブが取り付けられ、短期解析を開始した。柱端部に対するスタブの接合については、長期解析で柱端部の変形に合致するようにスタブの接合部が取り付けられ、そのまま弾性体として挙動するような複合モデルを構築した。さらに、短期解析の場合には柱上端のスタブの上面が水平を保ちながら水平変位を受け、軸方向についてはそのまま自由に鉛直変位が生じるように境界条件を設定した。また、本解析では軸力変動は考慮せず、長期用軸力と短期用軸力とは同じ条件を設定した。

(8) 解析因子と水準

表-3 に、本研究における解析因子と水準を示す。解析因子は、乾燥収縮ひずみの最終値、クリープ解析の有無、長期ならびに短期の軸力比の 4 種類である。乾燥収縮については、 $0 \sim 600 \mu$ の範囲で設定し、軸力比は 0% または 20% とした。こうして、計 16 のモデルを設定し、乾燥収縮ひずみごとにシリーズを 4 つに分け、1 シリーズは 4 つのモデル条件を設定した。

表-1 長期解析における設定条件

長期軸力	乾燥収縮ひずみ	乾燥開始材齢	解析開始材齢	長期解析期間	クリープ係数	圧縮強度
※1	$\times 10^{-6}$	日	日	年	※2	N/mm^2
0 or 0.2	0 ～ 600	365	365	50	3～4	27

※1：設計基準強度に対する比

※2：載荷開始から 50 年間におけるクリープ係数

表-2 コンクリート調合表⁵⁾

呼び強度	粗骨材最大寸法	スランプ	単位水量	水セメント比	細骨材率	単位粗骨材量
—	mm	cm	kg/m^3	%	%	kg/m^3
27	20	18	175	57	48.8	924

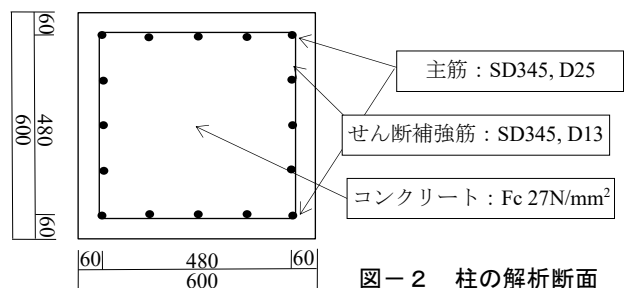


図-2 柱の解析断面

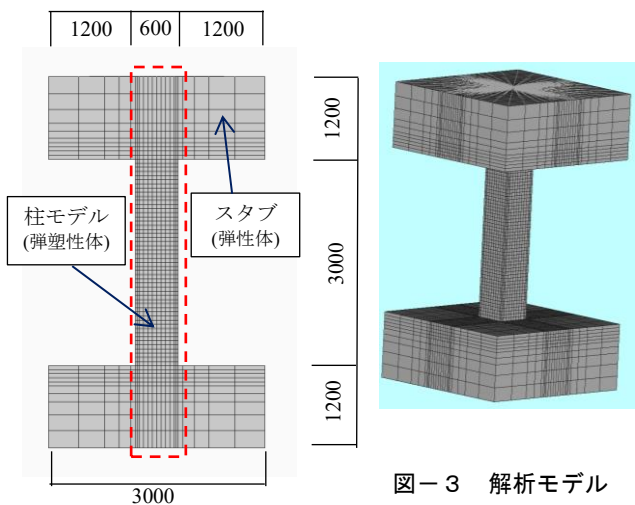


図-3 解析モデル

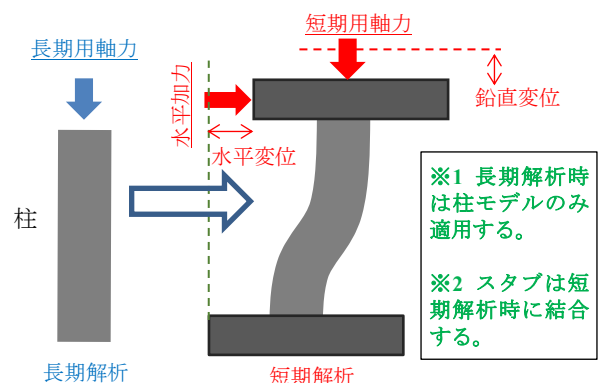


図4 加力状況

表－３ 解析因子と水準

シリーズ	model 番号	乾燥収縮 ひずみ	クリープ 解析の有無	軸力比(%) (長期・短期)
I	1	0	無	0
	2		有	
	3		無	20
	4		有	
II	5	200	無	0
	6		有	
	7		無	20
	8		有	
III	9	400	無	0
	10		有	
	11		無	20
	12		有	
IV	13	600	無	0
	14		有	
	15		無	20
	16		有	

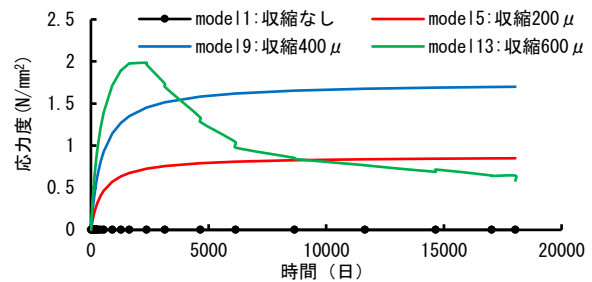
３．解析結果および考察

３．１ 長期解析

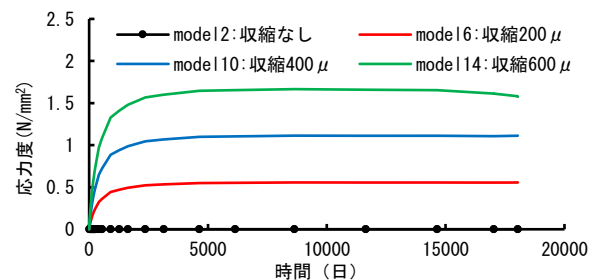
(1) コンクリート応力

図－５に、クリープ解析なし・軸力比 0% の場合のコンクリート応力の経時変化を示す。コンクリート応力は、柱中央部断面の平均値を求めた（以下、同様）。また、長期解析での時間は材齢 1 年の作用開始時点を 0 としている。すべてのモデルについて引張応力が作用した。そのうち、model11, 5, 9 で比較すると、乾燥収縮の増大にとともに引張応力は大きくなり、model15, 9 については、10000 日（概ね 20 年から 30 年）前後で定常状態となった。一方、model113 は引張強度に達するとひび割れが生じ、コンクリート応力は大きく低下した。続いて、図－６に、クリープ解析あり・軸力比 0% の場合のコンクリートの経時変化を示す。クリープによって引張応力が緩和され、引張強度以下になったため、すべてひび割れが生じない状態となった。ただし、図－５と比較して定常状態になる経過時間は早く、概ね 5000 日（15 年程度）で一定値を示した。これは、鉄筋に拘束されたコンクリートは乾燥収縮ひずみによって引張応力が生じるが、クリープを考慮すると乾燥収縮が継続して増加してもその応力は低減され続ける。その影響がこのような現象として生じたものと思われる。

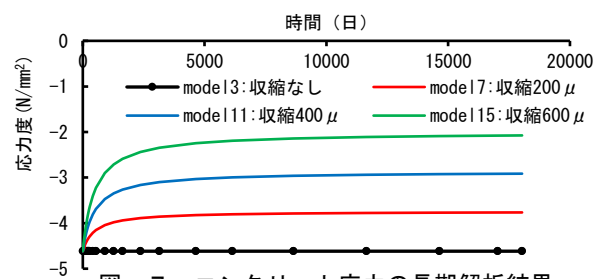
図－７に、クリープ解析なし・軸力比 20% の場合のコンクリートの経時変化を示す。軸力による圧縮応力の発生により、コンクリート応力はすべて圧縮応力が作用し、ひび割れは生じていない。また、乾燥収縮が大きくなるほどコンクリート応力は低下し、概ね 10000 日程度で定常状態となった。続いて、図－８に、クリープ解析あり・軸力比 20% の場合のコンクリートの経時変化を示す。長



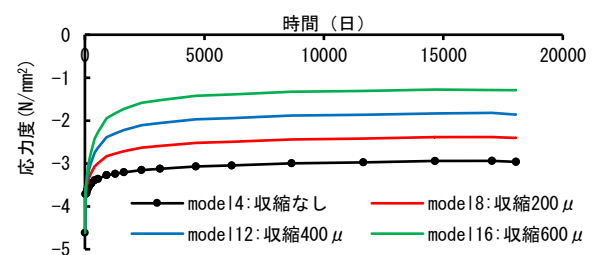
図－５ コンクリート応力の長期解析結果
(クリープ解析：なし、軸力比：0%)



図－６ コンクリート応力の長期解析結果
(クリープ解析：あり、軸力比：0%)



図－７ コンクリート応力の長期解析結果
(クリープ解析：なし、軸力比：20%)



図－８ コンクリート応力の長期解析結果
(クリープ解析：あり、軸力比：20%)

期的にはクリープによって、図－７よりも圧縮応力は緩和された定常状態を呈した。

(2) 主筋応力

図－９にクリープ解析なし・軸力比 0% の場合の主筋応力の経時変化を示す。コンクリートの収縮によりすべてのモデルについて圧縮応力が作用した。そのうち、model15, 9 は乾燥収縮の増大に伴い圧縮応力は大きくなるものの、model113 ではコンクリートにひび割れが生じたため、主筋応力は大きく低下した。続いて、図－１０にクリープ解析あり・軸力比 0% の場合の主筋応力の経時変化を示す。クリープによってコンクリート応力が緩

和されたため、それに伴って圧縮応力も緩和した。この条件ではコンクリートにひび割れが生じなかったため、主筋応力は単調に増加した。

図-11にクリープ解析なし・軸力比20%の場合のコンクリートの経時変化を示す。軸力により圧縮応力が作用するとともに、乾燥収縮の発生とともにその応力はさらに増大した。続いて、図-12にクリープ解析あり・軸力比20%の場合の主筋応力の経時変化を示す。コンクリートのクリープによって、図-11の場合よりも主筋の圧縮応力はさらに増大した。その結果、model16（収缩量：600 μ ）では長期許容応力（195N/mm²）に近い値（182N/mm²）となった。これは、著者らの既報³⁾や小室

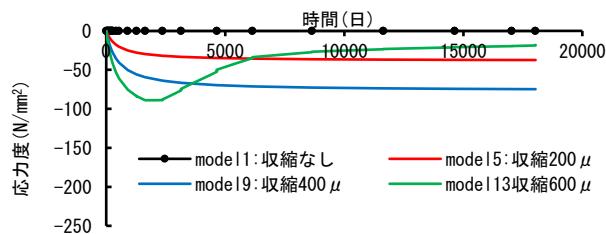


図-9 鉄筋応力の長期解析結果
(クリープ解析：なし，軸力比：0%)

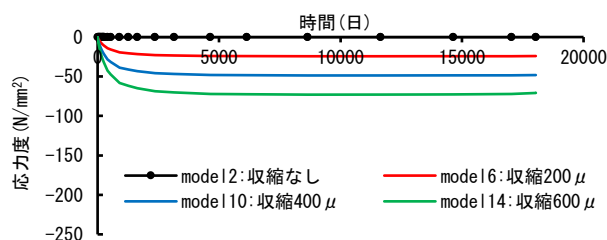


図-10 鉄筋応力の長期解析結果
(クリープ解析：あり，軸力比：0%)

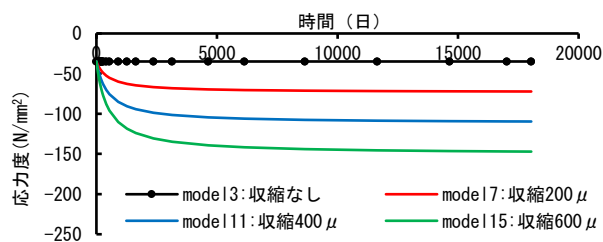


図-11 鉄筋応力の長期解析結果
(クリープ解析：なし，軸力比：20%)

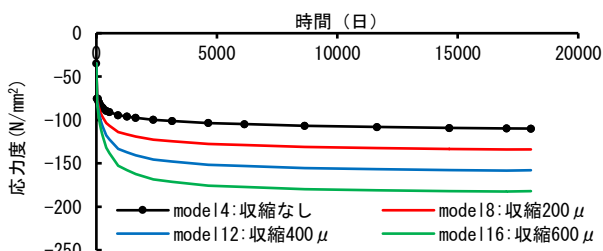


図-12 鉄筋応力の長期解析結果
(クリープ解析：あり，軸力比：20%)

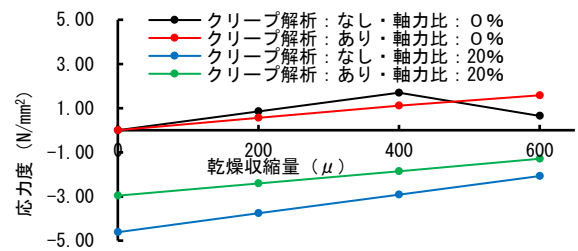


図-13 コンクリート応力の最終値

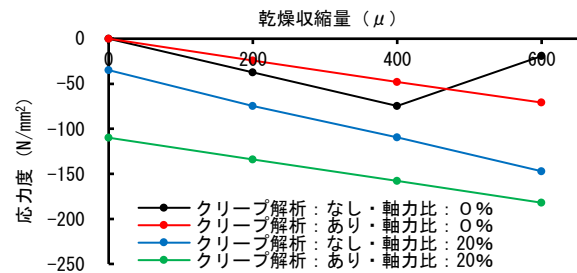


図-14 主筋応力の最終値

ら⁷⁾による超高強度コンクリートによる解析結果と同様な結果となり、主筋の長期性状は許容応力度について考慮する必要性を示している。

(3) 乾燥収縮による影響

図-13および図-14に、コンクリートおよび主筋応力度の長期解析結果の最終値（50年後推定値）と乾燥収缩量との関係をそれぞれ示す。コンクリート応力度は、乾燥収缩量が増すほどその値も大きくなるが、主筋の拘束によってひび割れが生じた場合には大きくその値は小さくなる。さらに、クリープによってその値も緩和される。また、軸力が作用する場合には、すべて圧縮応力であり、この解析条件の範囲であれば、主筋によってひび割れが生じる恐れはないものと考えられる。

一方、主筋の応力度も、乾燥収缩量が大きくなるほどその値も同様に大きくなるが、クリープによってコンクリートの場合とは異なってより大きな値を示す。

3. 2 短期解析結果

(1) 軸力比0%・クリープ解析なしの場合

図-15に軸力比0%・クリープ解析なしとした場合の部材角と曲げモーメントとの関係を示す。ここで、曲げモーメントは、せん断力をせん断スパンで乗じた値とした。せん断スパンは、反曲点を柱の内法長さの中央として求めた（以下、同じ）。乾燥収縮ひずみの大きさが大きくなるほど、最大値に達するまでの剛性が小さくなる傾向を示した。ただし、最大値についての大きな差は見られなかった。変形初期に剛性が小さくなったのは、コンクリートには主筋拘束によって引張応力が生じ、変

形初期の圧縮抵抗力が圧縮鉄筋に依存してすることが要因と考えられる。図-16に圧縮縁コンクリート応力度、図-17に引張側主筋応力度、図-18に圧縮側主筋応力度をそれぞれ示す。コンクリート応力度および引張側主筋応力度は、乾燥収縮ひずみが増すにつれて、最大値あるいは降伏値に達する部材角は大きくなり、変形初期剛性が小さくなる要因がうかがえる。特に、ひび割れが生じた model13 については、大きな剛性低下が見られる。これらの結果は、石川ら⁸⁾による引張軸力を作用させた柱の実験研究を参考とすれば、引張軸力比が大きくなるほど、降伏点までの初期剛性は小さくなり、特に引張ひび割れが生じると鉄筋剛性のみの部材剛性に近くなるという実験結果と同様な傾向を示した。

(2) 軸力比 0%・クリープ解析ありの場合

図-19に軸力比 0%・クリープ解析ありとした場合の部材角と曲げモーメントとの関係を示す。乾燥収縮の大きさが大きいほど最大耐力までの剛性は前述と同様に小さくなる傾向を示したが、その差異はクリープ解析なしの場合よりも小さくなった。これは、クリープによってコンクリートの引張応力は緩和され、乾燥収縮ひずみによる影響が小さくなったものと考えられる。

(3) 軸力比 20%・クリープ解析なしの場合

図-20に軸力比 20%・クリープ解析なしとした場合の部材角と曲げモーメントとの関係を示す。N-M インタラクションの影響で、軸力比 0%の場合より曲げ耐力は向上し、曲げ耐力および最大値に達するまでの初期剛性とも乾燥収縮ひずみが大きくなるほど小さくなった。ただし、変形がさらに大きくなると、曲げモーメントの値は同じ値に近づく。以上の傾向は、既報²⁾と同じである。

(4) 軸力比 20%・クリープ解析ありの場合

図-21に軸力比 20%・クリープ解析ありとした場合の部材角と曲げモーメントとの関係を示す。図-20の結果と同様に、乾燥収縮ひずみが生じる場合には、全体的にやや最大曲げモーメントに達するまでの剛性は低下した。また、乾燥収縮ひずみが生じる場合には、それがない場合に比べてすべての曲げ耐力はやや低下する傾向を示した。

(5) 乾燥収縮による影響

図-22に曲げモーメントの最大値と乾燥収縮量との関係を日本建築学会式⁹⁾による算定値と比較して示す。また、図-23に、日本建築学会式⁹⁾による降伏点剛性低下率から算定した降伏点時の部材角における曲げモー

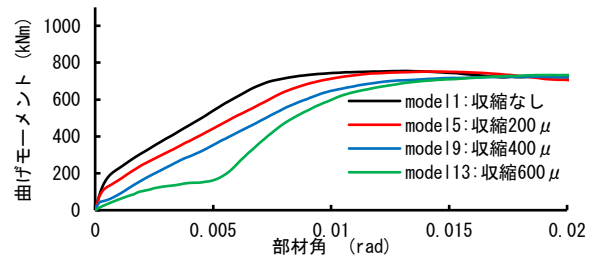


図-15 部材角—曲げモーメント関係
(軸力比 0%, クリープ解析: なしの場合)

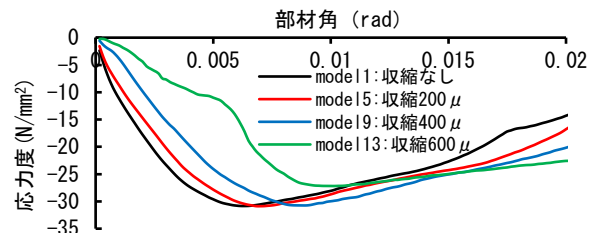


図-16 部材角—圧縮縁コンクリート応力度関係

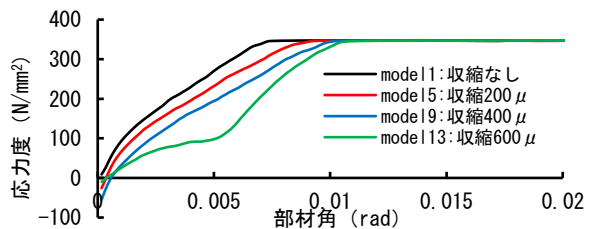


図-17 部材角—引張側主筋応力度関係

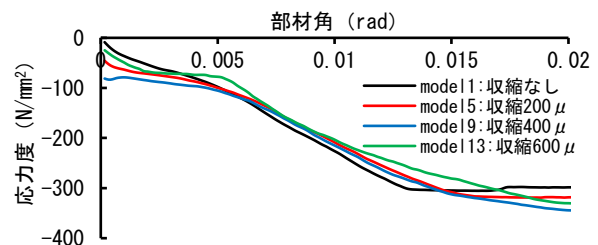


図-18 部材角—圧縮側主筋応力度関係

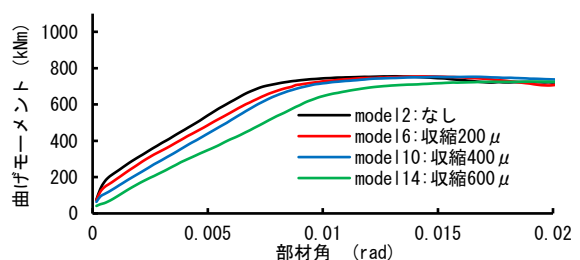


図-19 部材角—曲げモーメント関係
(軸力比 0%, クリープ解析: ありの場合)

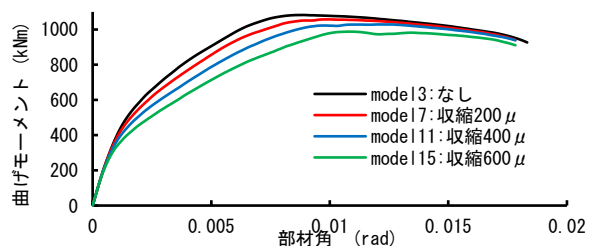


図-20 部材角—曲げモーメント関係
(軸力比 20%, クリープ解析: なしの場合)

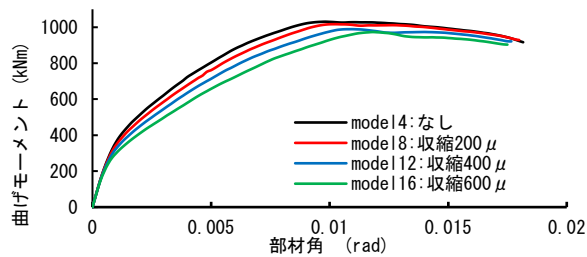


図-2-1 部材角—曲げモーメント関係
(軸力比 20%, クリープ解析: ありの場合)

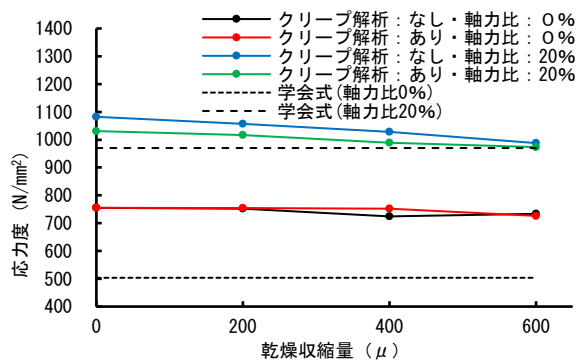


図-2-2 乾燥収縮量—最大曲げモーメント関係

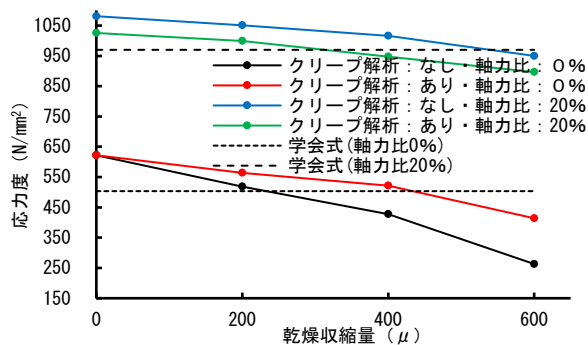


図-2-3 乾燥収縮量—降伏点時の曲げモーメント関係

メントを乾燥収縮量との関係を示す。最大曲げモーメントについては、軸力比 0%および 20%ともに乾燥収縮量の影響は小さく、特に軸力比 0%の場合にはほぼ一定値を示した。また、いずれも建築学会式を上回った。

学会式による降伏点時での曲げモーメントは、軸力比 0%および 20%とも、乾燥収縮量が大きくなるほど低下し、剛性低下に影響を大きく及ぼす結果となった。特に、軸力比 0%において大きな影響がある。

4. まとめ

1)長期解析結果について、コンクリート応力度は主筋の拘束によって、乾燥収縮量がある値以上となると引張強度に達してひび割れる恐れがある。しかし、本解析の範囲内ではクリープによって応力は緩和され、ひび割れる恐れのない引張応力が生じた。

2)長期解析結果について、主筋応力度は乾燥収縮量が大きくなるほど大きくなる傾向にあり、軸力が作用する場合には、乾燥収縮量が大きくなると長期許容応力度に達する恐れがある。

3)短期解析結果について、曲げモーメントの最大値は、軸力が作用する場合には乾燥収縮によってやや低下する傾向を示したが、軸力が作用しない場合には、乾燥収縮の影響はほとんどなくほぼ一定値を示した。また、いずれも建築学会式を上回った。

4) 短期解析結果について、最大値曲げモーメントに達するまでの剛性は、いずれの場合も乾燥収縮ひずみの影響を受け、乾燥収縮量が大きくなるほど剛性の低下傾向は著しくなった。

【謝辞】

本研究に当たって、佐藤知明氏（阪神高速技術先進技術研究所）にご指導をいただきました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1)渡部嗣道ほか：自己歪が鉄筋コンクリート造建築物の構造性能に与える影響に関する研究 その 1. 3 次元非線形構造解析用ソフトウェア「Soft-OCU」の開発，日本建築学会学術講演梗概集・構造IV，pp.667-668，2016
- 2)渡部嗣道ほか：乾燥収縮ひび割れが構造性能に与える影響に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.561-566，2016
- 3)河東宏樹，渡部嗣道ほか：乾燥収縮とクリープを受ける柱の曲げ性状に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.2，pp.1-6，2020
- 4)渡部嗣道ほか：乾燥収縮と長期軸力が柱の N-M インタラクション性状に与える影響 その 1～4，日本建築学会学術講演梗概集・構造IV，pp.211-228，2021
- 5)大阪広域生コンクリートホームページ (<https://www.osaka-kouiki.or.jp>)：普通コンクリート標準調合表（高性能 AE 減水剤），2018.3
- 6)土木学会：コンクリート標準示方書（設計編），2017
- 7)小室努，今井和正，是永健好，渡邊史夫：超高強度鉄筋コンクリート柱の長期圧縮特性に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.223-228，2008
- 8)石川裕次，木村秀樹，山本正幸：高強度材料を用いた柱部材の引張軸力時の復元力特性に関する研究，構造工学論文集，Vol.50B，pp.47-58，2004.3
- 9)日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準（案）・同解説，2016.6